

**Method and apparatus for lapping or polishing optical surfaces**

Patent Number: DE3801969  
Publication date: 1989-07-27  
Inventor(s): HEYNACHER ERICH DR (DE); BECKSTETTE KLAUS DR (DE); SCHMIDT MICHAEL DR (DE)  
Applicant(s): ZEISS CARL FA (DE)  
Requested Patent: ☐ DE3801969  
Application Number: DE19883801969 19880123  
Priority Number(s): DE19883801969 19880123  
IPC Classification: B24B13/00  
EC Classification: B24B13/015, B24B49/16  
Equivalents: ☐ FR2626208, ☐ JP1222855

---

**Abstract**

---

The polishing tool, moved relative to the workpiece (1), consists of a membrane (2) covering the entire surface of the workpiece and a plurality of loading elements (5) arranged on the rear side and with individually controllable press-on force. During the polishing movement of the tool, the pressure distribution generated by the loading elements on the surface of the workpiece to be worked is kept stationary by controlling the pressures of the loading elements, moved in association, as a function of their position

relative to the workpiece.



---

Data supplied from the esp@cenet database - I2



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
11 DE 3801969 A1

51 Int. Cl. 4:  
B24B 13/00

21 Aktenzeichen: P 38 01 969.8  
22 Anmeldetag: 23. 1. 88  
43 Offenlegungstag: 27. 7. 89

DE 3801969 A1

Behördeneigentlich

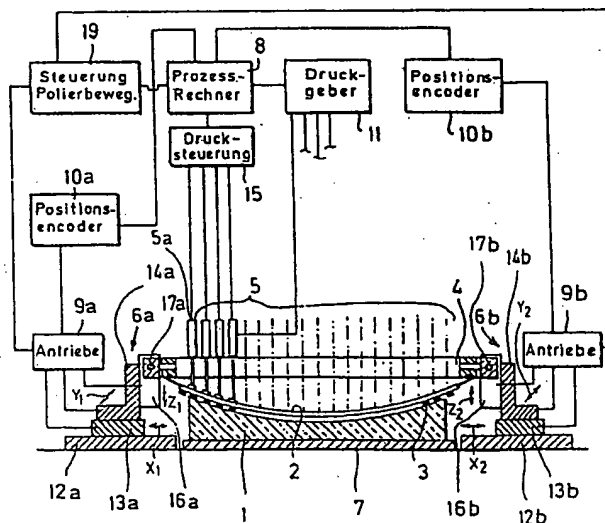
71 Anmelder:  
Fa. Carl Zeiss, 7920 Heidenheim, DE

72 Erfinder:  
Heynacher, Erich, Dr., 7920 Heidenheim, DE;  
Beckstette, Klaus, Dr.; Schmidt, Michael, Dr., 7080  
Aalen, DE

54 Verfahren und Vorrichtung zum Läppen bzw. Polieren optischer Flächen

Das relativ zum Werkstück (1) bewegte Polierwerkzeug besteht aus einer die gesamte Werkstückfläche bedeckenden Membran (2) und mehreren auf der Rückseite angeordneten Belastungselementen (5) mit einzeln ansteuerbarer Andruckkraft. Während der Polierbewegung des Werkzeugs wird die von den Belastungselementen erzeugte Druckverteilung auf der zu bearbeitenden Fläche des Werkstücks stationär gehalten, indem die Drücke der mitbewegten Belastungselemente abhängig von ihrer Position relativ zum Werkstück gesteuert werden.

Fig. 1



DE 3801969 A1

Das Läppen und Polieren von relativ großen optischen Bauteilen, wie sie z.B. für astronomische Beobachtungen benötigt werden, ist mit konventionellen Techniken eine sehr zeitaufwendige Arbeit. Denn es ist äußerst schwierig, die gewünschte Form mit der erforderlichen Genauigkeit von Bruchteilen der Lichtwellenlänge, typisch etwa 10–50 nm RMS, über die gesamte zu bearbeitende Fläche zu erzeugen.

Zur Verkürzung der Bearbeitungszeit wurde bereits ein Verfahren vorgeschlagen, das ein die gesamte zu bearbeitende Fläche des Werkstücks bedeckendes Werkzeug in Form einer flexiblen Membran vorsieht. Das Werkzeug, an dessen Unterseite die Polierelemente befestigt sind, oszilliert dabei tangential über das Werkstück unter einer Reihe von relativ zum Werkstück feststehenden Belastungselementen. Diese Belastungselemente erzeugen eine aus den Abweichungen des Werkstücks von der Sollform berechnete Druckverteilung. Mit diesem, aus der DE-A1-34 30 499 bekannten Verfahren ist es jedoch schwierig, auch an den Kanten des Werkstücks die oben genannte Genauigkeit einzuhalten. Außerdem ist die Größe der asphärischen Abweichungen begrenzt, die sich mit dem Verfahren in das Werkstück hinein polieren lassen, weil die flexible Membran relativ steif sein muß, damit ein individuelles Durchprägen der Aktuatoren bzw. Belastungselemente auf das Werkstück verhindert ist.

Aus der US-PS 23 99 924 ist ein Polierverfahren bekannt, welches ähnlich wie das vorgenannte eine sich über die gesamte zu bearbeitende Fläche erstreckende, flexible Membran als Werkzeug vorsieht. Dieses Werkzeug wird mit einer an den vorberechneten Materialabtrag angepaßten Druckverteilung belastet. Gleichzeitig rotiert das zu bearbeitende Werkstück.

Mit diesem Verfahren lassen sich aber nur rotations-symmetrische Abweichungen von der Sollform des Werkstücks bzw. der zu bearbeitenden Fläche herauspolieren. Außerdem ist es nicht möglich, kurzperiodische Abweichungen zu beseitigen, denn die Druckverteilung auf der Rückseite des Werkzeuges verschiebt sich bei den Polierbewegungen relativ zum Werkstück. Denn zur Druckerzeugung verwendet das bekannte Verfahren Gewichte, die auf der Membran aufliegen und sich mit der Membran über die zu bearbeitende Fläche bewegen.

In der älteren Anmeldung P 36 43 914.2 ist ein Polierverfahren für große optische Bauteile beschrieben, das ein streifenförmiges Polierwerkzeug verwendet. Die Drucke der sich auf dieser streifenförmigen Membran abstützenden Aktuatoren werden zumindest in einer Bewegungsrichtung abhängig von der Relativposition zwischen Werkzeug und Werkstück gesteuert.

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren anzugeben, mit dem die vorstehend genannten Nachteile des veröffentlichten Standes der Technik vermieden werden. Das Verfahren sollte möglichst kurze Bearbeitungszeiten ermöglichen und bezüglich der zu beseitigenden Formabweichungen möglichst universell anwendbar sein.

Diese Aufgabe wird ausgehend von dem im Oberbegriff genannten und einleitend beschriebenen Verfahren gemäß dem Kennzeichen des Anspruchs 1 dadurch gelöst, daß der Druck der gesamten Werkstück bedeckenden Belastungselemente abhängig von der momentanen Relativposition zwischen dem Werkzeug mit der zu bearbeitenden Fläche und dem Werkzeug so

gesteuert wird, daß die Druckverteilung relativ zum Werkstück stationär bleibt.

Die zur Durchführung des Verfahrens benutzte Vorrichtung besitzt deshalb an die Antriebe zur Herbeiführung der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück angeschlossene Positionsmesssysteme sowie eine mit den Positionsmesssystemen und den Belastungseinrichtungen verbundene Steuerung, so daß die von den Belastungselementen ausgeübten Kräfte abhängig von der momentanen Position zwischen Werkstück und Werkzeug so gesteuert werden können, daß die Druckverteilung relativ zu der zu bearbeitenden Fläche, d.h. relativ zum Werkstück stationär bleibt bzw. feststeht.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren lassen sich relativ hohe asphärische Deformationen in die zu bearbeitende Fläche hineinpolieren bzw. hineinlappen, ohne daß bei der Bearbeitung des Randes des Werkstücks Probleme auftreten.

Außerdem besitzt die zur Durchführung des Verfahrens benutzte Vorrichtung einen einfacheren Aufbau und läßt sich leichter handhaben, wenn die Belastungselemente zusammen mit der Membran über die zu bearbeitende Fläche bewegt werden, als wenn allein die Membran unter ihnen weggezogen werden muß. Zwar ist ein steuerungstechnischer Aufwand erforderlich, weil die Drucke der einzelnen Belastungselemente während der Polierbewegung dauernd individuell mit der nötigen Geschwindigkeit nachgestellt werden müssen. Die technischen Voraussetzungen hierfür sind heute jedoch gegeben. Es können zweckmäßig Pneumatikzylinder und -ventile eingesetzt werden, die von einem Prozeßrechner angesteuert werden, in dessen Speicher die stationär zu haltende Druckverteilung abgespeichert ist.

Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachstehenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Fig. 1–3 der beigefügten Zeichnungen.

Fig. 1 ist eine Prinzipskizze einer für das Läppen bzw. Polieren von astronomischen Teleskopen geeigneten Vorrichtung im Schnitt;

Fig. 2 zeigt die Vorrichtung aus Fig. 1 in Aufsicht;

Fig. 3 ist ein Blockschaltbild der zum Betrieb der Vorrichtung aus Fig. 1 bzw. Fig. 2 verwendeten Steuerung.

Die in Fig. 1 und Fig. 2 dargestellte Läpp- bzw. Poliervorrichtung dient zur optischen Oberflächenbearbeitung eines ortsfest auf einer Unterlage (7) aufgestellten Werkstücks (1). Im dargestellten Beispiel ist das Werkstück (1) ein Kreisringsegment eines konkaven, asphärischen Teleskopspiegels für z.B. astronomische Beobachtungen.

Das zur Bearbeitung des Werkstücks (1) bewegte Läpp- bzw. Polierwerkzeug besteht aus einem starren Rahmen bzw. einer Halteplatte (4), an deren Unterseite eine flexible und in ihrer Form an die konkave Oberfläche des Spiegels (1) angepaßte Membran (2) befestigt ist. Die Membran (2) trägt an ihrer Unterseite den Läpp- bzw. Poliergrund, bestehend aus einer Vielzahl von einzelnen Läpp- bzw. Polierpads (3) aus z.B. Pech.

Die Dicke der Membran (2) hängt von der Größe des Werkstücks (1) und seiner asphärischen Deformation ab. Sie kann bei Spiegelabmessungen von mehreren Metern im Durchmesser einige Zentimeter dick sein. Als Material für die Membran (2) kann Aluminium verwendet werden, jedoch sind auch andere Materialien, beispielsweise Kunststoffe geeignet.

Auf der Oberseite der Befestigungsplatte (4) sind eine Vielzahl von einzelnen, individuell ansteuerbaren Belastungselementen (5) dicht nebeneinander angeordnet.

Diese Belastungselemente (5) stützen sich mit einzeln einstellbarer Kraft auf der Rückseite der Membran (2) ab. In den Fig. 1 und 2 sind aus zeichnerischen Gründen nur wenige der Belastungselemente (5) dargestellt. Tatsächlich ist jedoch die gesamte Rückseite der Membran (2) dicht an dicht mit den Belastungselementen besetzt. Im Einzelfall können dies bis zu mehreren hundert Belastungselemente bzw. Aktuatoren sein.

Wie die Fig. 2 zeigt ist das gesamte eigentliche Werkzeug bestehend aus Membran (2), Befestigungsplatte (4) und Aktuatoren (5) an drei um  $120^\circ$  gegeneinander versetzten Stellen über drei Kardangelenke (17a, b und c) beweglich mit drei Antriebseinheiten (6a, 6b und 6c) verbunden. Die Antriebseinheiten (6a, b, c) sind nach Art eines in drei Raumrichtungen beweglichen Kreuzschlittens aufgebaut. Im nachfolgenden wird nur die Antriebseinheit (6a) beschrieben, die Antriebseinheiten (6b und 6c) besitzen exakt den gleichen Aufbau und entsprechende Bezugszeichen sind dort mit dem Zusatz "b" bzw. "c" versehen.

Auf einer ortsfesten Führung (12a) ist der in einer ersten Richtung  $X_1$  verschiebbare Schlitten (13a) aufgesetzt. Dieser trägt wiederum den senkrecht dazu in der waagerechten, d.h. in Richtung  $Y_1$  verschiebbaren Schlitten (14a), an dem die vertikale Z-Führung für den Träger (16a) angebracht ist. Auf dem Träger (16a) stützt sich die Befestigungsplatte (4) über das Kardangelenke (17a).

Jedem der drei verschiebblichen Schlitten sind Antriebe in Form von Hydraulikzylindern zugeordnet. Die Hydraulikzylinder für alle drei Bewegungen  $X_1$ ,  $Y_1$  und  $Z_1$  sind mit (9a) bezeichnet und werden ebenso wie die entsprechenden Antriebe (9b) und (9c) an den beiden anderen Stützstellen des Werkzeugs von einer Steuereinheit (19) in eine kontrollierte Bewegung versetzt. Hierbei sind die drei mal drei Antriebe (9a, b, c) des Werkzeugs so miteinander synchronisiert, daß die Membran (2) eine tangentielle Polierbewegung einstellbarer Amplitude und Frequenz auf der Oberfläche des Werkstück (1) durchführt.

Den Antrieben (9a), (9b) und (9c) sind außerdem Positionscodier (10a), (10b), (10c) zugeordnet. Deren Ausgänge sind einem Prozeßrechner (8) zugeführt, der die Oszillationsbewegungen der Antriebe (9a), (9b) und (9c) überwacht. Mit Hilfe der Signale der Positionscodier (10a), (10b) und (10c) und der vorher bekannten geometrischen Anordnung der Belastungselemente (5) auf der Rückseite der Membran (2) errechnet der Prozeßrechner (8) die momentane Position jedes einzelnen der mit der Membran (2) mitbewegten Belastungselemente (5) relativ zu der zu bearbeitenden Werkstückoberfläche.

Im Speicher des Prozeßrechners (8) ist außerdem die Druckverteilung als zweidimensionale Funktion der Koordinaten  $X$  und  $Y$  abgelegt, die die Membran (2) auf das Werkstück (1) ausüben muß, damit im Zuge des Polierprozesses die vorher z.B. interferometrisch gemessenen Formabweichungen des Werkstücks (1) von seiner Idealform beseitigt werden.

Die Belastungselemente (5) sind wie schon gesagt bezüglich der auf die Rückseite der Membran (2) ausgeübten Kraft individuell ansteuerbar. Hierzu sind Pneumatikzylinder für jeden Aktuator (5) vorgesehen, die von einer Druck-Steuereinheit (15) beaufschlagt werden. Die Druck-Steuereinheit (15) ist ebenfalls an den Prozeßrechner (8) angeschlossen. Außerdem ist der Druckregelkreis durch entsprechende Druckgeber an den Aktuatoren (5) geschlossen, deren Signale ebenfalls an den Prozeßrechner (8) gehen.

Der Prozeßrechner (8) ordnet nun jedem der Aktuatoren (5) aus der gespeicherten Druckverteilung den Druck zu, der seiner im Zuge der Polierbewegung gerade eingenommenen Position entspricht. Gleichzeitig stellt die Drucksteuereinheit (15) mit Hilfe von Pneumatikventilen die berechneten Drucke in allen Aktuatoren (5) ein. Dieser Einstellvorgang erfolgt in Echtzeit mit einer Zeitkonstante von ca. 10–20 Hz, während das Werkzeug die oszillierende Polierbewegung über dem Werkstück (1) durchführt. Auf diese Weise wird die Druckverteilung, die vom Werkzeug auf die zu bearbeitende Oberfläche ausgeübt wird, konstant bzw. stationär gehalten, während sich die Belastungselemente (5) mit der Membran (2) über das Werkstück (1) hinwegbewegen.

In Fig. 3 ist das Blockschaltbild für die Steuerung der Funktionen der Poliervorrichtung aus Fig. 1 und Fig. 2 dargestellt. Kernstück ist der einschließlich seiner Peripherieeinheiten mit (8) bezeichnete Prozeßrechner, der sowohl die Antriebe als auch die Drucke der Aktuatoren (5) steuert. Für seine Bedienung und zur Eingabe der auf das Werkstück (1) auszuübenden Druckfunktion dient das Terminal (18).

Der Prozeßrechner (8) ist an ein Interface (28) angeschlossen, über das der gesamte Datenverkehr der Antriebe und Rückmeldeeinrichtungen mit einer Sampling-Frequenz von ca. 10–20 Hz läuft. Dieses Interface (28) ist über einen Datenbus an eine Elektronikeinheit (20) zur Positionsermittlung des Werkzeugs angeschlossen. Diese empfängt die Signale der Positionscodier (10a), (10b) und (10c) und gibt entsprechende Kommandosignale an die Hydrauliksteuerung (19) für die drei mal drei Antriebe (9a, b, c) des Werkzeugs ab. Der Betriebsdruck für die Hydrauliksteuereinheit (19) wird von einem separaten Hydraulikaggregat (29) aufgebracht.

Die Aktuatoren (5a–5b) des Polierwerkzeuges (2–4) sind mit dem Interface (28) über einen Adressenbus mit nachgeschalteten Adressendecodierer verbunden und gleichzeitig an den Datenbus und einen diesem nachgeschalteten Busdriver (25) angeschlossen. Ein Pneumatikaggregat (21) versorgt die Aktuatoren (5a–5n) mit Betriebsdruck. Auf diese Weise läßt sich jeder der Aktuatoren (5a–5n) mit dem für ihn vorgesehenen Druck individuell beaufschlagen.

Das mit Hilfe der in den Fig. 1–3 beschriebenen Vorrichtungen durchzuführende Läpp- bzw. Polierverfahren läuft folgendermaßen ab:

Zuerst werden in an sich bekannter Weise, beispielsweise interferometrisch, die Abweichungen der grob, z.B. sphärisch bearbeiteten Fläche des Werkstücks (1) von seiner Sollform ermittelt.

Anschließend wird rechnerisch aus den abzutragenden Formabweichungen die Druckverteilung berechnet, die bei vorgegebener Läpp- bzw. Poliergeschwindigkeit während einer bestimmten Bearbeitungszeit zu den gewünschten Ergebnissen führt. Diese Druckverteilung wird über einen Datenträger in den Prozeßrechner (8) geladen. Anschließend wird das gesamte Werkzeug bestehend aus Membran (2), Befestigungsplatte (4) und den Aktuatoren (5) von den Hydraulikantrieben (9a, b und c) der drei Antriebseinheiten (6a), (6b) und (6c) in eine oszillierende Polierbewegung versetzt. Hierbei ändert sich die Position jedes Aktuators relativ zur Oberfläche des Werkstücks (1).

Der Rechner (8) steuert die Drucke aller Aktuatoren (5) nun so, daß die auf den Spiegel wirkende Druckverteilung stationär bleibt und in jeder Stellung der Aktuatoren (5) der eingespeicherten Druckverteilung ent-

spricht.

Wenn die rechnerisch ermittelte Bearbeitungszeit abgelaufen ist, wird der Bearbeitungsprozeß gestoppt und das Werkstück wieder vermessen. Hieran schließt sich iterativ der nächste Polierprozeß an.

Im beschriebenen Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 und Fig. 2 wird das zur Bearbeitung verwendete Werkzeug über das feststehende Werkzeug (1) bewegt. Es ist jedoch klar, daß die Polierbewegung auch bei feststehendem Werkzeug durch entsprechend am Werkstück (1) angreifende Antriebe herbeigeführt werden kann.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Läppen bzw. Polieren optischer Flächen, wobei die zu bearbeitende Fläche vorher vermessen wird und der Läpp- bzw. Poliervorgang entsprechend den Abweichungen der Istform der Fläche von einer vorbestimmten Sollform gesteuert wird, indem

- auf die Fläche ein Läpp- bzw. Polierwerkzeug aufgelegt wird, welches aus einer flexiblen Membran (2) sowie einer Einrichtung mit einer Vielzahl von einzelnen Belastungselementen (5) besteht,
- mit den Belastungselementen auf der Rückseite der Membran eine Druckverteilung erzeugt wird, die den Abweichungen der Fläche von ihrer Sollform entspricht und
- die Membran (2) zusammen mit der Einrichtung zur Erzeugung der Druckverteilung durch im wesentlichen tangentiale Kräfte über der zu bearbeitenden Fläche bewegt wird,

dadurch gekennzeichnet, daß der Druck der das gesamte Werkstück (1) bedeckenden Belastungselemente (5) abhängig von der momentanen Relativposition zwischen dem Werkzeug und der zu bearbeitenden Fläche so gesteuert wird, daß die Druckverteilung relativ zum Werkstück stationär bleibt.

2. Vorrichtung zum Läppen bzw. Polieren optischer Flächen mit

- einem Werkzeug, das aus einer elastischen Membran (2) besteht, die den Läpp- bzw. Poliergrund (3) trägt,
- einer Einrichtung zur Erzeugung einer Druckverteilung, die eine Vielzahl von Belastungselementen (5) umfaßt, die sich mit individuell steuerbarer Kraft auf der Rückseite der Membran (2) abstützen und diese gegen die Fläche drücken, und
- mit Antrieben, von denen die Membran (2) zusammen mit den Belastungselementen (5) im wesentlichen tangential über die zu bearbeitende Fläche bewegt wird,

dadurch gekennzeichnet, daß

- die Antriebe mit Positionsmeßsystemen (10) zur Bestimmung der Position des Werkzeugs relativ zu der zu bearbeitenden Fläche versehen sind,
- eine mit den Positionsmeßsystemen und den Belastungselementen (5) verbundene Steuerung (8, 15) vorgesehen ist, von der die Drucke der relativ zur optischen Fläche bewegten Belastungselemente abhängig von ihrer Position so gesteuert werden, daß die Druckverteilung relativ zur Fläche stationär bleibt.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (2) und die Belastungselemente (5) die gesamte zu bearbeitende Fläche bedecken.

4. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Membran (2) und die Belastungselemente (5) von einem Rahmen (4) gehalten sind, der sich an mindestens drei Stellen (6a, b, c) abstützt, und jeder der drei Stützstellen Antriebe (9a, b, c) für eine Bewegung in allen drei Raumrichtungen (X, Y, Z) besitzt.

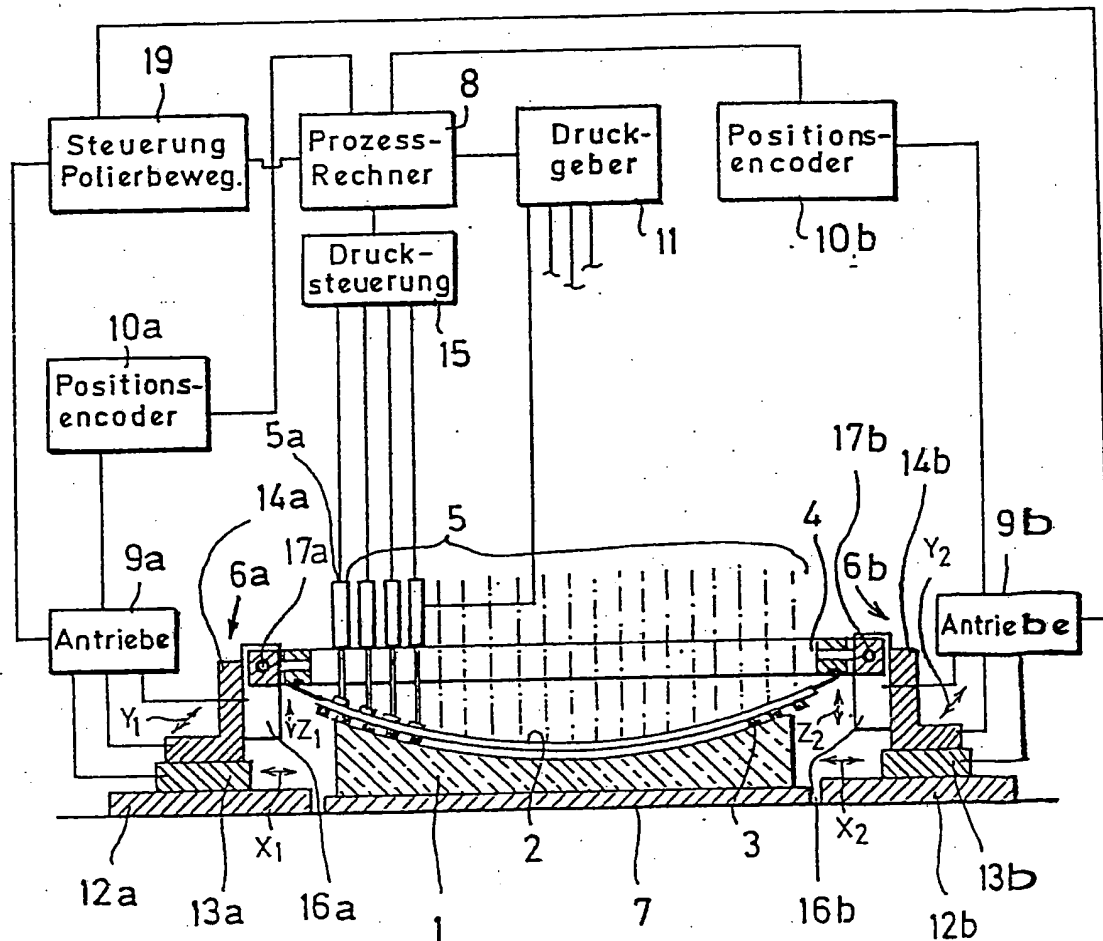
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß als Antriebselemente an den Stützstellen Hydraulikzylinder eingesetzt sind.

6. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Belastungselemente (5) druckluftgesteuerte Aktuatoren sind.

- Leerseite -

3801969

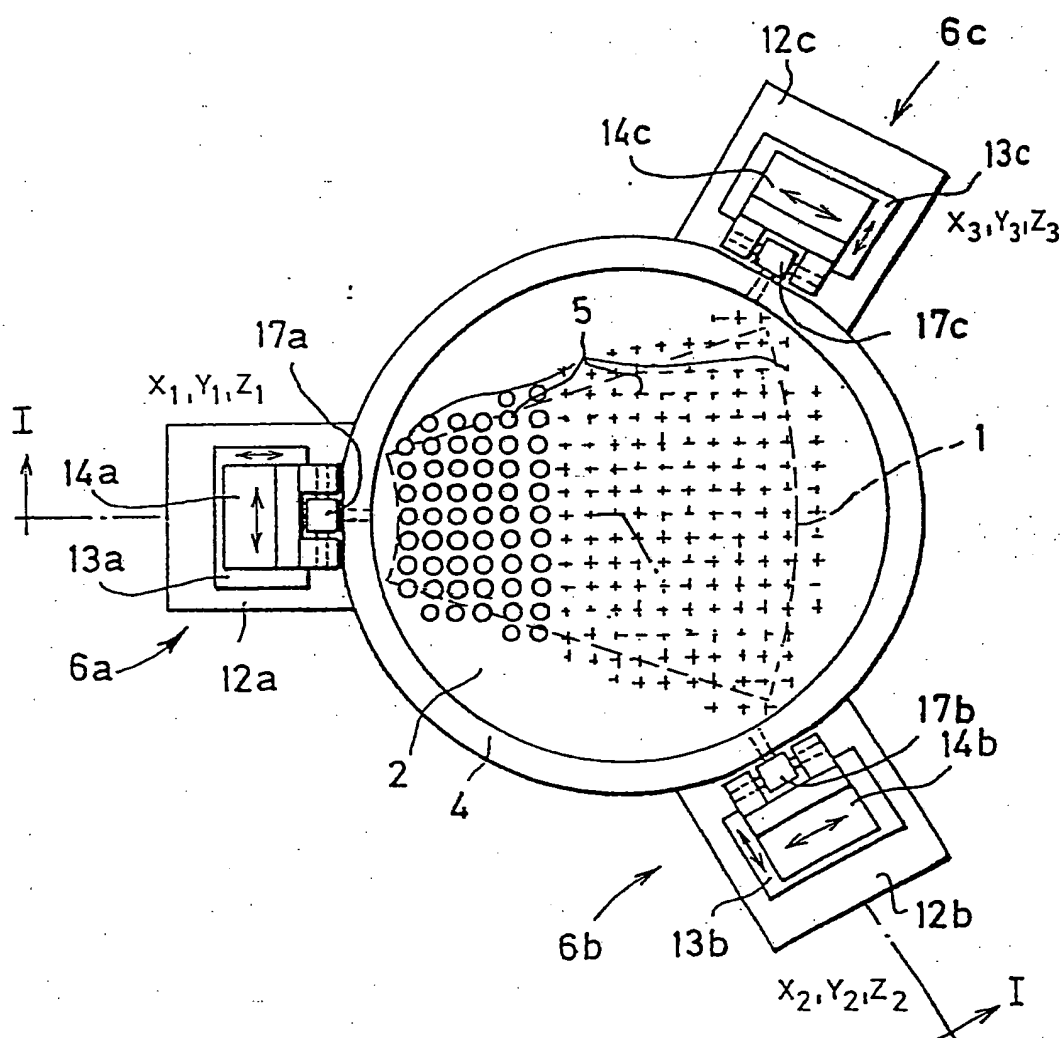
Fig. 1



3801969

12

Fig. 2





3801969

13\*

Fig. 3

